Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 347-359

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۵۹-۳۴۷

بررسی اثر بلند مدت استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر کارایی عملیاتی و روند نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر با استفاده از سری‌های زمانی

فاطمه افشارنیا[۱*]، افشین مرزبان[۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۱/۲۳
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۴/۰۵

چکیده

کارکرد مطلوب و نگهداری سیستم‌های مهندسی ارتباط تنگاتنگی با پیش‌بینی دقیق خرابی‌های آن‌ها دارد. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه به‌عنوان یک استراتژی مؤثر در بهبود قابلیت اطمینان، دوره عمر مفید و کارایی تجهیزات نقش اساسی ایفا می‌کند. استفاده از روش‌های بازرسی دوره‌ای منظم و سرویس‌دهی، منجر به بهبود راندمان نگهداشت و نهایتاً موجب کاهش هزینه‌های آن می‌شود. هدف از این مطالعه، بررسی روند نرخ خرابی و کارایی ماشین برداشت نیشکر در طی یک دوره ۶ ساله و پیش‌بینی آن در شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان بود. برای این منظور الگوهای سری زمانی ARIMA برآورد و بهترین الگو انتخاب گردید. طبق نتایج نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۰، ۷۳/۲۳ درصد کاهش داشته است. کارایی عملیاتی ماشین برداشت نیشکر نیز در همین مدت، ۱۴/۹ درصد افزایش داشته است. زیر سیستم‌های تاپر، برق و موتور به‌ترتیب با ۹۴/۷۵، ۸۰/۴۶ و ۵۸/۷۴ درصد کاهش خرابی‌ها در سال ششم نسبت به سال اوّل بیشترین تأثیرپذیری را از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نشان دادند. بر اساس نتایج حاصل از پیش‌بینی متغیر نرخ خرابی مشخص شد که تفاوت چندانی در روند نرخ خرابی پیش‌بینی‌شده و نرخ خرابی واقعی ماشین برداشت نیشکر وجود ندارد که این امر بیانگر دقت بالای پیش‌بینی با استفاده از مدل ARIMA می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ARIMA، پیش‌بینی، کارایی، ماشین برداشت نیشکر، نرخ خرابی

مقدمه

نگهداری و تعمیرات یکی از بخش‌های بسیار مهم در افزایش بهره‌وری و اثربخشی (Karbasi *et al.*, 2011) ناوگان مکانیزه تولید کشاورزی است. یک سیستم نگهداری و تعمیرات مناسب باید بتواند متناسب با هدف انجام به‌موقع عملیات کشاورزی را تضمین کند. برداشت نیشکر به‌عنوان یک عملیات استراتژیک، نیازمند بهره‌گیری از مدیریت مکانیزاسیون در سطح منطقه می‌باشد. اگر محصول خیلی زود یا خیلی دیر برداشت شود، ممکن است به‌علت کاهش درصد قند استحصالی، درآمد حاصله کاهش پیدا کند. طول دوره برداشت نیشکر در شرایط خوزستان بسته به وضعیت جوی بین ۴ تا ۶ ماه می‌باشد. اغلب به‌علت مصادف شدن فصل برداشت (پاییز و زمستان) با بارندگی و شرایط نامناسب رطوبت مزرعه، عملیات برداشت به‌موقع انجام نمی‌گیرد و به تعویق می‌افتد، در نتیجه میزان درجه خلوص و درصد قند محصول کاهش می‌یابد؛ تأخیر در برداشت نیشکر و کشیده شدن برداشت تا اردیبهشت ماه می‌تواند به میزان ۳۰-۲۰ درصد استحصال شکر را کاهش دهد (Monjezi *et al.*, 2017). به‌همین دلیل قابلیت اطمینان، در دسترس بودن، کاهش زمان ازکارافتادگی و تعمیرات هرچه بیشتر تجهیزات برداشت نیشکر، دارای اهمیت فراوانی است. از کار افتادن دستگاه‌ها و سیستم‌ها موجب ایجاد اختلال در سطوح مختلف تولیدی و پشتیبانی می‌شود و می‌تواند به‌عنوان تهدیدی جدی در جهت افزایش هزینه‌های تولید تلقی شود (Vafaei *et al.*, 2010). نگهداری عبارت است از مجموعه فعالیت‌هایی که به‌طور مشخص و معمولاً به‌صورت برنامه‌ریزی شده با هدف جلوگیری از خرابی ناگهانی ماشین‌آلات، تجهیزات و تأسیسات انجام می‌گیرد تا قابلیت اطمینان و در دسترس بودن آن‌ها افزایش یابد (Rasekhi and Shamsi, 2010). سیاست‌های نگهداری شامل دو دسته تعمیرات اصلاحی[۳] و نگهداری پیشگیرانه[۴] است. در سیاست اصلاحی، تعمیرات پس از شکستگی یا وقوع آشکار یک خرابی انجام می‌شود. در سیاست پیشگیرانه، نگهداری جهت جلوگیری از وقوع شکستگی قطعات اجرا می‌شود. سیاست نگهداری پیشگیرانه مبتنی بر زمان، برنامه‌های نگهداری بر پایه زمان را جهت قطعات تعویضی اعمال می‌کند (Amari and McLaughlin, 2006) که شامل برنامه روانکاری، بررسی‌ها و تنظیم‌های روزانه می‌باشد (Wireman, 2005). در هر

۱- دانشجوی دکتری گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
۲ دانشیار گروه مهندسی ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: phd.afsharnia@asnrukh.ac.ir)
DOI: 10.22067/jam.v10i2.70962

3- Corrective maintenance
4- Preventive maintenance

نوع برنامه‌ریزی نگهداری و تعمیرات می‌بایست به این واقعیت توجه داشت که خرابی و ازکارافتادگی ماشین‌ها مسئله‌ای نیست که بتوان به‌طور مطلق از آن جلوگیری و ممانعت نمود، بلکه می‌توان با استفاده از فنون برنامه‌ریزی، قابلیت اطمینان و قابلیت بهره‌برداری از ماشین‌ها را بهبود بخشید (Shirmohammadi, 2002). پیش‌بینی خرابی ماشین‌ها، نقش مهمی در کاهش هزینه‌های سربار فرآیندهای تولید دارد (Atashkar and Saravani, 2016)؛ بنابراین کاربرد ابزارهای پیش‌بینی‌کننده دقیق ضروری به نظر می‌رسد. تکنیک‌های رگرسیونی اولین بار توسط انجمن مهندسان کشاورزی امریکا برای پیش‌بینی هزینه‌های تعمیر و نگهداری استفاده شدند (Bowers and Hunt, 1970; Sabir *et al.*, 1990) که پس از آن در مطالعات زیادی از این تکنیک برای پیش‌بینی هزینه‌ها استفاده شد (Vafaee *et al.*, 2008; Morris, 1988; Almasi and Yaganeh, 2002; Rasekhi and Shamsi, 2010). اما Rohani *et al.* (2009) جهت پیش‌بینی هزینه‌های تعمیر و نگهداری تراکتور دو چرخ محرک از شبکه عصبی مصنوعی استفاده کرده و به این نتیجه رسیدند که مدل بهینه شبکه عصبی در مقایسه با رگرسیون دارای متوسط قدر مطلق درصد خطا و ریشه متوسط مربعات خطای کمتری می‌باشد. در پژوهشی دیگر نیز، این هزینه‌ها را به کمک شبکه عصبی RBF[1] پیش‌بینی کرد (Rohani, 2013). در ارزیابی نرخ‌های خرابی، تابع نمایی[2] رایج‌ترین تابع به‌شمار می‌آید (Say and Sumer, 2011). Afsharnia *et al.* (2014) این تکنیک را جهت پیش‌بینی میزان خرابی تراکتورها به‌کار بردند و نرخ خرابی چهار مدل تراکتور را با استفاده از تابع نمایی ارزیابی کردند. اما علاوه بر رگرسیون، سری زمانی نیز شاخه‌ای از علم آمار است که با استفاده از اطلاعات گذشته متغیرها امکان پیش‌بینی مقادیر آینده را می‌دهد که این یک فاکتور کلیدی در برنامه‌ریزی، سیاست‌گذاری و مدیریت سیستم‌ها است (Pinches, 1970). سری زمانی یک الگوی قوی دوره‌ای دارد که می‌تواند مدل‌سازی کرده و طبق آن پیش‌بینی کند (García *et al.*, 2010). García *et al.* (2010) روش‌های سری زمانی را برای پیش‌بینی و تشخیص عیب به‌کار بردند. Amin *et al.* (2013) نیز از مدل آریما سری‌های زمانی برای پیش‌بینی قابلیت اطمینان نرم‌افزار استفاده کردند.

در ماشین برداشت نیشکر زیرسیستم‌ها تعمیرپذیر هستند؛ بنابراین، با استفاده از سیستم و همچنین افزایش عمر آن، قابلیت اطمینان سیستم کاهش و نرخ خرابی افزایش خواهد یافت (Najafi *et al.*, 2014). در نتیجه، لازم است در امر نگهداری و تعمیرات با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های پیشرفته، سرمایه‌گذاری‌های لازم صورت پذیرد تا بتوان حداکثر بهره‌وری از سرمایه‌های هزینه شده در خرید ماشین‌ها را به‌عمل آورد (Khodabakhshian and Shakeri, 2011). روش‌های بهینه‌سازی طول عمر[3]، دوام تجهیزات تحت نگهداری پیشگیرانه را به اندازه ۴۰-۳۰ درصد نسبت به آن‌هایی که تحت نگهداری ضعیفند، افزایش می‌دهد (Wireman, 2005). این پژوهش جهت بررسی دقیق اثر نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بر نرخ خرابی و کارایی عملیاتی ماشین برداشت نیشکر صورت پذیرفت تا مؤثر بودن این استراتژی نگهداری بر کاهش توقفات از طریق مطالعه در روندی چند ساله و پیش‌بینی آینده نرخ خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین مورد بررسی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق بر روی ۳۰ دستگاه ماشین برداشت نیشکر از نوع استافت مدل ۷۰۰۰ با ۱۴ سال کارکرد از شرکت توسعه نیشکر و صنایع جانبی استان خوزستان انجام شد. اطلاعات مربوط به کارکرد هر دستگاه دروگر در مدت زمان ۶ سال زراعی از ۱۳۹۱-۱۳۹۰ تا ۱۳۹۶-۱۳۹۵ که تحت نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بودند، جمع‌آوری گردید. نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در این شرکت شامل کلیه برنامه‌های بازرسی فنی، برنامه‌های روانکاری، عیب‌یابی و رفع عیب، تعمیر برنامه‌ریزی شده، تعویض قطعه، تعمیر اضطراری و تعمیرات اساسی برای هر دستگاه ماشین برداشت نیشکر می‌باشد. این راهبرد نگهداری و تعمیرات بر پایه زمان استوار است و در آن براساس دوره‌های زمانی از پیش تعریف شده، دستگاه از عملیات برداشت خارج و مورد بازرسی قرار می‌گیرد. بر اساس بازرسی صورت پذیرفته تعمیرات لازم انجام و دستگاه دوباره به عملیات زراعی برمی‌گردد. بنابراین براساس این راهبرد، تعویض قطعات، بازسازی و تعمیر اساسی دستگاه در دوره زمانی قطعی بوده و صرف‌نظر از شرایط کارکردی آن، در زمان مقرر عملیات لازم بر روی آن انجام می‌شود. عمده‌ترین اطلاعات جمع‌آوری شده ساعت‌های استفاده سالیانه از دستگاه، تعداد خرابی سیستم‌های مختلف هر دستگاه و کارکرد بر حسب ساعت در دوره‌های زمانی مشخص را شامل می‌گردید. کلیه ماشین‌های برداشت مورد بررسی دارای شرایط نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه، سن و کاربری مشابهی بودند. برای اندازه‌گیری نرخ خرابی از رابطه (۱) استفاده شده است (Shirmohammadi, 2002; Afsharnia, 2017):

$$MTBF = \frac{T}{n}$$
$$L = \frac{1}{MTBF} \qquad (۱)$$

1- Radial Basis Function Neural Network
2- Exponential
3- Life time optimization

در اینجا MTBF[1] متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی، L نرخ خرابی، T کل زمان سیکل (ساعت) و n تعداد خرابی‌ها در یک سیکل زمانی می‌باشد.

شاخص کارایی عملیاتی (رابطه ۲) نسبت مقدار کارکرد مفید تجهیزات به مقدار برنامه‌ریزی‌شده در طول یک دوره کاری تعریف می‌شود و کلیه توقفات از ساعت کارکرد در دسترس کسر شده و تنها خالص کارکرد دستگاه مدنظر قرار می‌گیرد (Hansen, 2008).

$$AOE = \frac{T_a}{T_i} \quad (۲)$$

در اینجا T_a توان عملیاتی واقعی، T_i توان عملیاتی برنامه‌ریزی شده و AOE[2] کارایی عملیاتی خالص است.

برای تعیین قابلیت دسترس‌پذیری از رابطه (۳) که بیانگر قابلیت دسترس‌پذیری ذاتی (مکانیکی) است، استفاده شد (Hall and Daneshmend, 2010):

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (۳)$$

در اینجا MTBF میانگین زمان بین خرابی‌های ماشین، MTTR میانگین زمان تعمیرات و A قابلیت دسترس‌پذیری است.

مدل‌های به‌کار گرفته‌شده در این تحقیق شامل مدل سری زمانی (ARIMA) بود. مدل فرآیند یا الگوی خود توضیح میانگین متحرک (ARIMA) از تلفیق فرآیندهای خودتوضیح و میانگین متحرک به‌وجود می‌آید و به‌صورت رابطه (۴) قابل نمایش می‌باشد (Box *et al.*, 2014):

$$[1-\varphi_1(B)-\varphi_2(B)^2-\cdots-\varphi_P(B)^P]\times L_t = c + [1-\theta_1(B)-\theta_2(B)^2-\cdots-\theta_q(B)^q]\times e_t \quad (۴)$$

که در این رابطه، φ_i: نشان‌دهنده پارامتر مدل اتورگرسیو و θ_i: نشان‌دهنده پارامتر مدل میانگین متحرک، p: مرتبه مربوط به مدل اتورگرسیو، q: مرتبه مربوط به مدل میانگین متحرک، c: مقدار ثابت، e_t: خطا در زمان t، B: عامل عقب رونده و L_t: مقدار سری زمانی نرخ خرابی در زمان t (بر حسب ساعت) است.

در این مطالعه آزمون ریشه واحد دیکی فولر تعمیم‌یافته[3] (ADF) برای تشخیص ایستایی فرآیندهای سری زمانی نرخ خرابی استفاده شد. زمانی که متغیر ناپایا یا دارای ریشه واحد باشد، فرآیند تکنیک اقتصادسنجی مرسوم ممکن است مناسب نباشد زیرا تخمین رگرسیونی منجر به برآوردهای تورش‌دار و گمراه‌کننده می‌شود (Engle and Granger, 1987). از این‌رو ایستایی متغیر نرخ خرابی آزمون شده و سپس به برآورد الگو پرداخته شد. برای آزمون ایستایی سری نرخ خرابی از آزمون ریشه واحد و بسته نرم‌افزاری XLSTAT 2017 استفاده شد.

برای اطمینان از قابلیت پیش‌بینی سری و به‌عبارتی تصادفی نبودن آن، قبل از استفاده از روش‌های پیش‌بینی، آزمون تصادفی بودن سری داده‌های نرخ خرابی مورد بررسی قرار گرفت. در صورتی‌که داده‌ها تصادفی باشند، استفاده از مدل‌های پیش‌بینی بر اساس روند گذشته مجاز نخواهد بود (Day, 1965). در این مطالعه تصادفی بودن متغیر نرخ خرابی با استفاده از آزمون دوربین–واتسون[4] بررسی گردید. در صورت پذیرفتن فرضیه وجود خودهمبستگی، فرض تصادفی بودن سری مردود است. استفاده از این آزمون مستلزم آن است که داده‌های نرخ خرابی دارای توزیع تقریباً نرمال باشند که برای این منظور از آزمون کلموگروف اسمیرنوف[5] بهره گرفته شد (Farajzadeh and Shah Vahi, 2009).

مراحل ساخت سری زمانی نرخ خرابی شامل چهار مرحله است که به صورت تکراری انجام شد (Saplioglu *et al.*, 2010):

۱- **مرحله شناسایی الگو:** در این مرحله با رسم توابع خودهمبستگی (ACF) و خودهمبستگی جزئی (PACF) ایستایی در میانگین و واریانس داده‌های نرخ خرابی ارزیابی شد (Currie, 1989). علاوه بر خودهمبستگی میان (L_t, L_{t+k})، جهت بررسی همبستگی میان (L_t, L_{t+k}) بعد از اینکه وابستگی خطی مشترک میان متغیرهای ($L_{t+1}, L_{t+2}, \ldots, L_{t+k-1}$) حذف شد، از تابع خودهمبستگی جزئی (PACF) استفاده شد. رفتار این توابع در همبستگی‌نگار، یکی از مهم‌ترین معیارها برای تخمین الگوی سری زمانی است. به‌دلیل ناایستایی، ابتدا سری مورد نظر با استفاده از سری تفاضلی مناسب در میانگین و واریانس پایدار شد و سپس سری ایستا گردید. در این مرحله با تجزیه و تحلیل واریانس داده‌های تفاضل شده نرخ خرابی مرتبه پارامتر d برای مدل طوری انتخاب شد که دارای حداقل واریانس باشد. از سوی دیگر، با استفاده از تابع‌های PACF و ACF مراتب p و q مشخص گردید.

۲- **برازش الگو (برآورد پارامترها):** در این مرحله با شناسایی الگوهای مناسب در مرحله قبل، برای مقایسه چند الگو و انتخاب بهترین آنها از معیار آکائیک استفاده گردید. معیار آکائیک اصلاح شده (AIC) از رابطه (۵) محاسبه می‌شود (Golabi *et al.*, 2014).

$$AIC = n\left(\ln\left(\frac{RSS}{n}\right)\right) + 2(p+q) \quad (۵)$$

در اینجا RSS: مجموع مربعات باقی‌مانده‌ها، p: مرتبه مربوط به مدل اتورگرسیو، q: مرتبه مربوط به مدل میانگین متحرک و n: تعداد داده‌های نرخ خرابی است. مدلی انتخاب می‌گردد که کمترین مقدار AIC را داشته باشد.

1- Mean time between failures
2- Absolute Operational Efficiency
3- Augmented Dickey Fuller
4- Durbin Watson test
5- Kolmogorov Smirnov test

۳- **تشخیص درستی الگو:** برای بررسی درستی مدل، مقادیر باقیمانده‌ها از نظر نرمال بودن و ایستایی ارزیابی شد.

۴- **پیش‌بینی:** نتایج به‌دست آمده به‌عنوان داده‌های نرخ خرابی پیش‌بینی‌شده برای ساعت‌های مورد نظر ارزیابی گردید. برای مدل‌سازی داده‌های نرخ خرابی از نرم‌افزار Minitab 17 و SPSS 19 استفاده گردید که اساس کار آن شیوه تکراری باکس- جنکینز است. برای بررسی کفایت مدل از آزمون پرت- مانتو استفاده شد. این آزمون از خودهمبستگی باقی‌مانده‌ها برای بررسی فرضیه صفر توأم $H_0: \rho_1 = \rho_2 = \cdots = \rho_k = 0$ آماره آزمون (۶) استفاده می‌کند.

$$Q = n(n+2)\sum_{h=1}^{k}(n-h)^{-1}\,\widehat{p_2^h} \qquad (۶)$$

که در آن n تعداد مشاهدات است. این آماره آزمون، آماره Q اصلاح شده یا همان LBQ است و تحت فرض H_0 تقریباً دارای توزیع χ^2_{k-m} است. m تعداد پارامترهای برآورد شده در مدل است. هرگاه مقدار آماره Q از مقدار متناظر جدول کی دو بیشتر باشد، فرضیه H_0 رد می‌شود. فرضیه H_0 در واقع فرضیه کفایت مدل است (El-Din and Smith, 2002).

ارزیابی دقت الگوهای پیش‌بینی

یکی از مراحل مهم در انتخاب بهترین مدل پیش‌بینی یک متغیر، اندازه‌گیری و تعیین دقت مدل‌ها است. در این مطالعه از دو معیار ریشه میانگین مجذور خطاهای پیش‌بینی (RMSE[1]) در رابطه (۷) و درصد میانگین خطاهای پیش‌بینی (MAPE[2]) در رابطه (۸) برای مقایسه دقت پیش‌بینی الگوها استفاده شد (Dodangeh *et al.*, 2012).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\widehat{L_t} - L_t)^2}{n}} \qquad (۷)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{(\hat{L}_t - L_t)}{L_t}\right| \times 100 \qquad (۸)$$

در اینجا n: تعداد پیش‌بینی‌ها، L_t: مقادیر واقعی نرخ خرابی (تعداد خرابی در ساعت)، $\hat{L}_t$: مقادیر پیش‌بینی شده نرخ خرابی (تعداد خرابی در ساعت) و $\hat{L}_t - L_t$: خطای پیش‌بینی است که از تفاوت مقادیر نرخ خرابی پیش‌بینی‌شده ($\hat{L}_t$) و مقادیر واقعی آن (L_t) به‌دست می‌آید.

نتایج و بحث

مشخصات آماری متغیرهای مورد مطالعه ماشین برداشت نیشکر در جدول ۱ آورده شده است. متوسط نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر در دوره بررسی برابر ۰/۱۴۷ خرابی در ساعت بود که حداکثر مقدار آن ۰/۵۱۷ خرابی در ساعت و در کمترین مقدار خود به صفر رسید. این ماشین‌ها به‌طور میانگین ۱۸۹/۸ ساعت در سال مورد استفاده قرار گرفتند. علاوه بر این، مقادیر آماره‌های F در جدول ۲ نشان داد که بین متوسط نرخ خرابی ماشین‌های برداشت نیشکر مورد بررسی اختلاف معنی‌داری وجود نداشت؛ زیرا شرایط کارکرد ماشین‌ها کاملاً یکنواخت و همگن بوده است. شکل ۱ الف روند متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی[3] را در نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی روندی افزایشی داشته است به‌طوری‌که با وجود گذشت زمان و فرسوده‌تر شدن دستگاه‌ها، متوسط فاصله زمانی بین دو خرابی در سال زراعی ۹۶-۹۵ نسبت به سال ۹۱-۹۰، ۲/۷ برابر شده است. افزایش این فاصله زمانی حاکی از کاهش خرابی‌ها می‌باشد. طبق نتایج Jacobs *et al.* (1983) ماشین‌ها ممکن است به‌خاطر نقص در طراحی، خسارت فیزیکی یا فرسودگی و شکستگی عادی دچار خرابی شوند، اما در اکثر موارد، ماشین‌ها به دلیل نبود برنامه مناسب نگهداری از کار می‌افتند. در این مطالعه نیز مشخص گردید، با اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نرخ خرابی روندی نزولی و کارایی عملیاتی دستگاه روندی صعودی پیدا کرده است (شکل ۱ب). به‌طوری‌که نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر در سال ۱۳۹۵ نسبت به سال ۱۳۹۰، ۷۳/۲۳ درصد کاهش و کارایی عملیاتی نسبت به سال اول مطالعه، ۱۴/۹ درصد افزایش داشته است زیرا بازبینی و نگهداری پیشگیرانه و به‌موقع، نه تنها به کاهش خرابی‌های بزرگ و از دست رفتن زمان کمک کرده است، بلکه در شناسایی خرابی‌هایی که می‌توانند با تعمیرات نسبتاً جزئی برطرف شوند، نیز بسیار مؤثر بوده است (Grisso and Pitman, 2009). فرکانس خرابی ماشین‌های کشاورزی نیز عمدتاً تحت تأثیر ساعت‌های کار سالیانه، سیاست‌های تعمیر و نگهداری و محیط کار قرار می‌گیرد (Say and Sumer, 2011). سرویس مرتب ماشین‌های کشاورزی و بازرسی پیوسته از آن‌ها و انجام هر نوع تعمیر جزیی می‌تواند از بسیاری خرابی‌های حین کار بکاهد (Afsharnia *et al.*, 2014). این نتایج با گزارش Anek (1994) و Amari *et al.* (2006) که دلیل اصلی خرابی‌ها را نگهداری ضعیف معرفی کردند، همخوانی دارد.

میزان برداشت دستگاه بر اساس عملکرد (تن/ ساعت) در طی سال‌های مورد بررسی روندی صعودی داشته است (شکل ۱ج). به‌طوری‌که میزان برداشت نیشکر با ۴۷ درصد افزایش از ۳۶ تن در ساعت در سال اول مطالعه به ۵۳ تن در ساعت در سال آخر تغییر داشته است. این بدان معنی است که بیشتر ساعت‌های کارکرد، دستگاه مشغول برداشت نیشکر بوده است و زمان پرت و تلف شده

1- Root mean squared error
2- Mean absolute percentage error
3- Mean time to failures

کمتری داشته است. تغییرات مربوط به دسترس‌پذیری ماشین برداشت نیشکر در سال‌های مورد مطالعه نیز گویای این مطلب است (شکل ۱د). دسترس‌پذیری ماشین برداشت نیشکر از ۰/۷۴ در سال اول مطالعه به ۰/۸۷ در سال آخر تغییر پیدا کرده است. افزایش ۱۷/۵ درصدی دسترس‌پذیری موجب کاهش تلفات زمانی و افزایش میزان برداشت نیشکر شده است.

شکل ۲ درصد نرخ‌های خرابی هر زیرسیستم را از کل خرابی‌های سیستم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشهود است زیرسیستم‌های برق، کف‌بر و هیدرولیک به‌ترتیب با ۲۲/۳۸، ۱۸/۲۶ و ۱۶/۵۳ درصد از کل خرابی‌های سیستم بیشترین خرابی‌های سیستم را به خود اختصاص دادند. روند نرخ خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین برداشت نیشکر طی مدت زمان ۶ سال در شکل ۳ آورده شده است. نرخ خرابی کلیه زیرسیستم‌ها با اعمال استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه روندی نزولی داشته‌اند. با وجود اینکه برخی زیر سیستم‌ها شامل سیستم‌های برق، کف‌بر، هیدرولیک، خردکن و بالابر در برخی سال‌ها نسبت به سال قبل روندی صعودی داشته‌اند، اما با وجود افزایش سن دستگاه‌ها در سال‌های آتی، با گذشت زمان و ادامه یافتن استراتژی نگهداری و تعمیرات به‌صورت پیشگیرانه روندی نزولی یافته‌اند، زیرا جهت مشاهده تأثیر هر برنامه و استراتژی نوین نیاز به گذشت زمان می‌باشد. زیر سیستم‌های تاپر، برق و موتور به‌ترتیب با ۹۴/۷۵، ۸۰/۴۶ و ۵۸/۷۴ درصد کاهش خرابی‌ها در سال آخر مطالعه نسبت به سال اوّل بیشترین تأثیرپذیری را از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه نشان دادند. نرخ خرابی دیگر زیرسیستم‌ها نیز با تداوم اعمال استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه کاهش یافت. زیر سیستم برق بیشترین نرخ خرابی در ماشین برداشت نیشکر را داشت؛ از این رو با اعمال سیستم نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه کاهش قابل ملاحظه‌ای را نشان داده است.

جدول ۱- مشخصات آماری متغیرهای مورد مطالعه ماشین برداشت نیشکر

Table 1- Descriptive statistics of variables in sugarcane harvester

متغیر **Variable**	میانگین **Mean**	کمینه **Min**	بیشینه **Max**	انحراف معیار **Standard deviation**	چولگی **Skewness**
نرخ خرابی Failure rate	0.147	0	0.517	0.107	1.52
ساعت استفاده سالیانه Annual use hour	189.8	26	622.5	112.94	1.66
ساعت استفاده تجمعی Cumulated time	2607.72	2006	3639	45.107	0.42

جدول ۲- مقایسه میانگین مقادیر نرخ خرابی ماشین‌های برداشت نیشکر مورد مطالعه با استفاده از آزمون آماری F

Table 2- Compare means of surveyed sugarcane harvesters failure rate using ANOVA

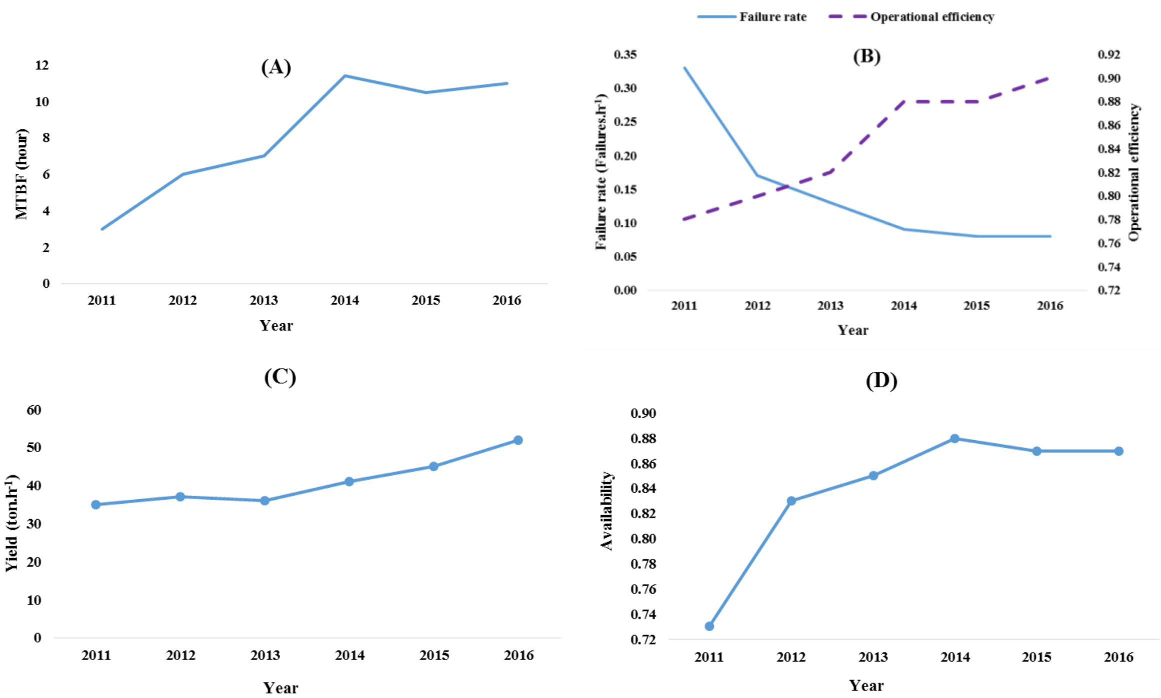
	مجموع مربعات **Sum of squares**	درجه آزادی **df**	میانگین مربعات **Mean square**	مقدار آماره **F value**	سطح معنی‌داری **Significant level**
بین گروه‌ها Between groups	0.159	29	0.005	0.476	0.979
درون گروه‌ها Within groups	1.738	150	0.011		
کل Total	1.896	179			

در مورد زیر سیستم موتور، در حالی‌که تعویض روغن یک دستورالعمل نگهداری بسیار حیاتی می‌باشد اما دستورالعمل‌های نگهداری بقیه زیرسیستم‌ها در یک ماشین می‌تواند به‌طور مثبت یا منفی عمر روغن را تحت تأثیر قرار دهد. تقریباً هر زیرسیستم در یک ماشین به نحوی متصل به موتور است. اجرای نگهداری روزانه ماشین یک فعالیت مهم برای افزایش عمر موتور است. وقتی همه زیرسیستم‌ها به‌طور بهینه در حال کار باشند، موتور می‌تواند به‌خوبی کار کند. به‌طور مثال تعویض فیلتر هوا، نگهداری مناسب از فیلتر اگزوز، تأمین سوخت و نازل‌های تمیز، نگهداری مناسب رادیاتور و مبدل‌ها و فشار باد مناسب تایرها می‌توانند عمر روغن موتور را تحت تأثیر قرار دهند. غفلت از همه این اجزا می‌تواند منجر به مشکلاتی در روغن موتور از جمله افزایش ترکیبات آب/گلیکول[1]، رقیق شدن زیاد سوخت، تشکیل دوده، ویسکوزیته غیرعادی، افزایش دوده و عدد اسیدی یا کاهش عدد قلیایی روغن شود (Kader *et al.*, 2014).

با توجه به اهمیت اطلاع از رفتار متغیر در طول زمان، آزمون‌های ایستایی و همچنین تصادفی بودن متغیر مورد مطالعه صورت پذیرفت. انجام آزمون ایستایی با استفاده از روش دیکی فولر تعمیم‌یافته نشان

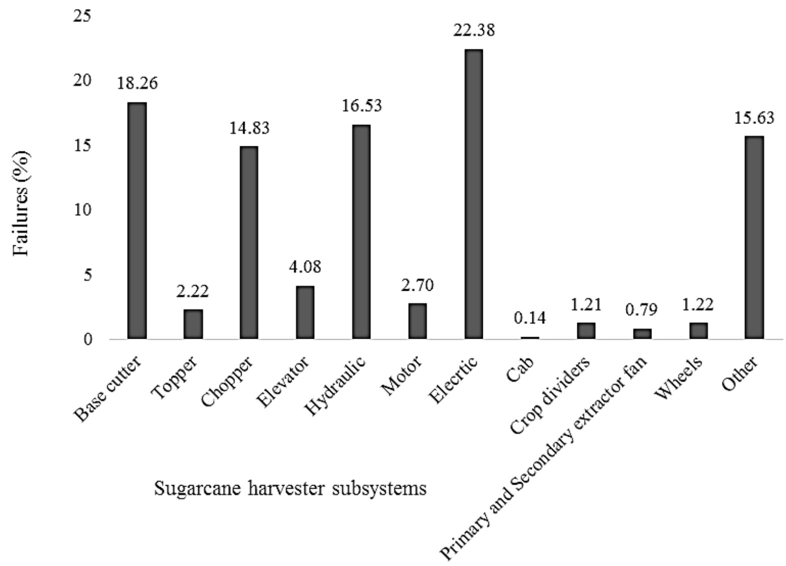
1- Glycol

داد که متغیر نرخ خرابی با انجام تفاضل‌گیری مرتبه سوم دارای ایستایی می‌باشد؛ بدین مفهوم که هیچ‌گونه روند و تناوبی در داده‌ها وجود ندارد و سری زمانی ایستا است. جزئیات مربوط به آزمون ایستایی در جدول ۳ آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود قدر مطلق آماره دیکی فولر تعمیم‌یافته محاسباتی از قدر مطلق مقدار آماره بحرانی بزرگتر است بنابراین، فرضیه صفر مبنی بر ریشه واحد بودن متغیر رد می‌شود و سری زمانی مانا است.



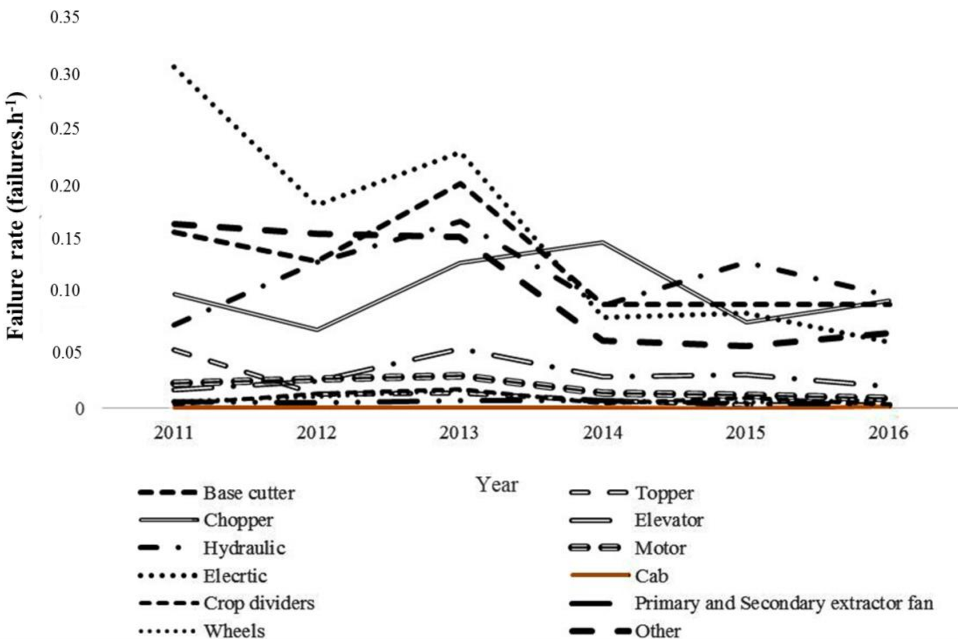
شکل ۱– الف) روند متوسط فاصله زمانی بین خرابی‌ها، ب) روند نرخ خرابی و کارایی عملیاتی، ج) عملکرد (تن/ساعت) و د) دسترس‌پذیری ماشین برداشت نیشکر از سال زراعی ۱۳۹۰ تا ۱۳۹۵

Fig. 1. A) The trend of MTBF, B) The trend of failure rate and operational efficiency, C) Yield (ton/h) and D) Availability for sugarcane harvester in 2011-2016



شکل ۲– متوسط درصد خرابی زیرسیستم‌های مختلف ماشین برداشت نیشکر

Fig. 2. The mean failure percent of several sugarcane harvester subsystems



شکل ۳- تغییرات نرخ خرابی کلیه زیرسیستم‌های ماشین برداشت نیشکر در سال‌های مختلف زراعی

Fig. 3. The changes in the failure rate of all sugar cane harvester subsystems in different agronomic years

همچنان‌که قبلاً گفته شد، یکی دیگر از آزمون‌های مهم قبل از انجام پیش‌بینی سری‌های زمانی، آزمون تصادفی بودن سری است. چنانچه یک متغیر روندی تصادفی داشته باشد، پیش‌بینی آن متغیر غیر ممکن خواهد بود. بر این اساس تصادفی‌بودن متغیر با استفاده از آزمون دوربین–واتسون مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به‌دست آمده در جدول ۴ ارائه گردیده است. به استناد نتایج حاصل از آماره این آزمون که مقدار آن بین ۱/۵ تا ۲/۵ می‌باشد، متغیر نرخ خرابی غیرتصادفی و بنابراین قابل پیش‌بینی است؛ یعنی خطاهای زمان t و t-1 از یکدیگر مستقل می‌باشند.

جدول ۳- نتایج مربوط به بررسی مانایی در سری نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Table 3- Results of stationary survey in the sugarcane harvester failure rate series

نوع آزمون مانایی **Test type**	درجه ایستایی **Stationary degree**	مقدار آماره بحرانی **Critical value**	مقدار آماره محاسباتی **Calculated value**	نتیجه آزمون **Test result**
ADF	I(3)	-3.56	-5.34	Stationary

جدول ٤- نتیجه آزمون تصادفی بودن دوربین واتسون

Table 4- The result of a randomized Durbin-Watson test

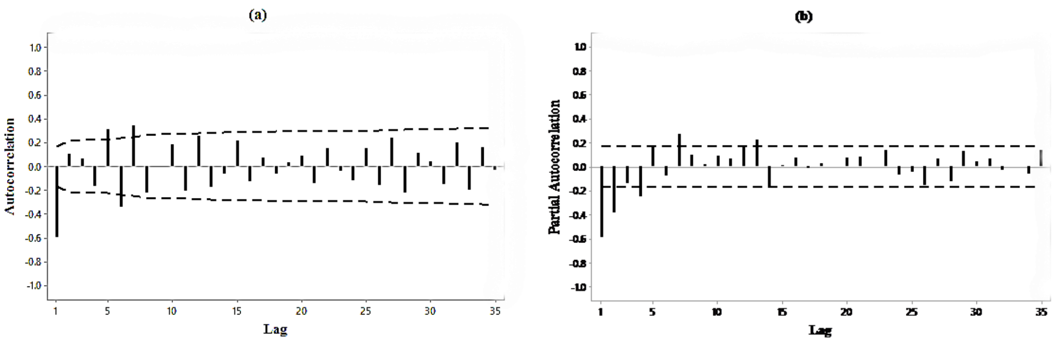
متغیر **Variable**	آماره کولموگروف اسمیرنوف **Kolmogorov Smirnov test**	آماره دوربین واتسون **Durbin-Watson test**	نتیجه آزمون **Test result**
نرخ خرابی Failure rate	1.05	1.971	سری غیرتصادفی است positive autocorrelation

اگر یک سری زمانی دارای تغییرات فصلی نباشد، در نتیجه همبستگی‌نگار آن هم متناوب نخواهد بود (Golabi *et al.*, 2014). این تابع بینشی از الگوی احتمالی که داده‌ها را تولید می‌کند، ارائه می‌دهد؛ که از این امر برای تشخیص و برازش مدل تصادفی مناسب برای داده‌ها، استفاده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۴ ملاحظه می‌گردد، با توجه به بیرون‌زدگی خطوط همبستگی‌نگار از حدود اطمینان (خط‌چین‌ها)، وجود همبستگی بین داده‌های ساعتی نرخ خرابی مشاهده می‌گردد که نشان‌دهنده مستقل نبودن داده‌های ساعتی در زمان‌های تأخیر مختلف است.

در این بخش سعی شده که بهترین مدل آریما برای پیش‌بینی نرخ خرابی در استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه برای ماشین برداشت نیشکر با توجه به رفتار تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی داده‌های نرمال استاندارد شده شناسایی گردد. همان‌طورکه در تابع خودهمبستگی ملاحظه می‌گردد، تغییرات غیرفصلی مشهود است. در شکل ۴ به‌ترتیب تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی ترسیم

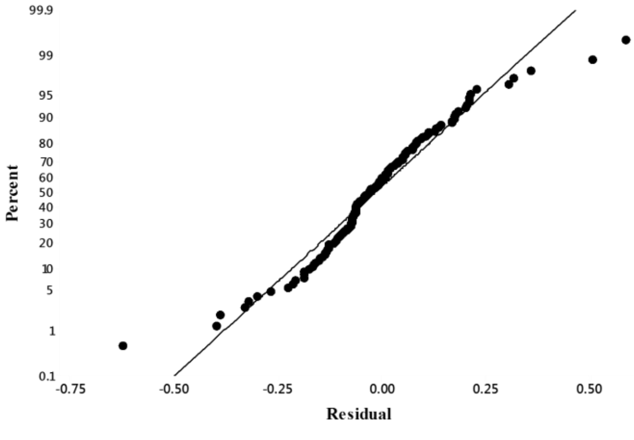
شد. برای انتخاب بهترین مدل از دیدگاه استفاده از حداقل پارامترهای تخمینی از معیار آکائیک اصلاح شده استفاده شد. معیار آکائیک برای بهترین مدل برازش یافته از بین کلیه مدل‌های ARIMA در جدول ۵ آورده شده است. همان‌گونه که ذکر شد، یکی از روش‌های صحت‌سنجی الگوهای برازش شده بر سری، تجزیه و تحلیل باقی‌مانده‌های الگوست. یک روش منطقی آزمون خطای مدل، آزمون نرمال بودن داده‌ها و همچنین رسم توابع خودهمبستگی باقی‌مانده‌های مدل است. اگر مدل برازش شده مدل مناسبی باشد، تابع خودهمبستگی نمونه‌های مانده هیچ ساختاری را نشان نمی‌دهند و به‌عبارت دیگر، برای تمام تأخیرها در بازه اطمینان قرار می‌گیرند. در شکل ۵ تابع توزیع تجربی مانده‌ها در کاغذ احتمالاتی نرمال نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که فرض نرمال بودن توزیع مانده‌ها درست است. روش رسمی‌تر برای بررسی مناسبت مدل که بر مبنای خودهمبستگی‌های باقی‌مانده‌هاست، آزمون پرت‌مانتو است. مقادیر آماره آزمون پرت‌مانتو (Q(r)) برای متغیر مورد نظر در جدول ۵ آورده شده است. برای قضاوت در مورد فرضیه H_0 مقدار آماره به‌دست آمده از پرت‌مانتو با مقدار λ^2 در سطح معنی‌داری ۵ درصد مقایسه گردید و از مقدار متناظر λ^2 کمتر بود. نتایج حاصل از تعیین نوع فرآیندی که متغیر از آن پیروی می‌کند، مبین آن است که نرخ خرابی در استراتژی نگهداری پیشگیرانه از فرآیند ARIMA تبعیت می‌کند.

انتخاب بهترین الگوی پیش‌بینی و تعیین جایگاه آن بر اساس معیارهای خطا یعنی RMSE و MAPE صورت گرفت. بدین مفهوم که برای پیش‌بینی هر یک از متغیرها از میان الگوهای مورد بررسی یعنی ARIMA الگوی حاوی کمترین خطای پیش‌بینی مورد استفاده قرار گرفت. در این راستا در جدول ۵ مقادیر RMSE و MAPE مربوط به الگو در پیش‌بینی نرخ خرابی ارائه گردیده است. بر اساس معیار MAPE می‌توان گفت که دقت پیش‌بینی الگو ۰/۵۶ درصد است و دقت مطلوبی محسوب می‌شود. به استناد اطلاعات آمده در جدول ۵، بهترین الگو برای پیش‌بینی نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر، الگوی ARIMA (1,3,2) است. شایان ذکر است که خطای پیش‌بینی این مدل نسبت به دیگر مدل‌ها حداقل و برابر با ۲ درصد به‌دست آمده است.



شکل ٤– تابع خودهمبستگی و خودهمبستگی جزئی سری زمانی نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Fig. 4. a) Autocorrelation and b) Partial autocorrelation function curve of sugarcane harvester failure rate



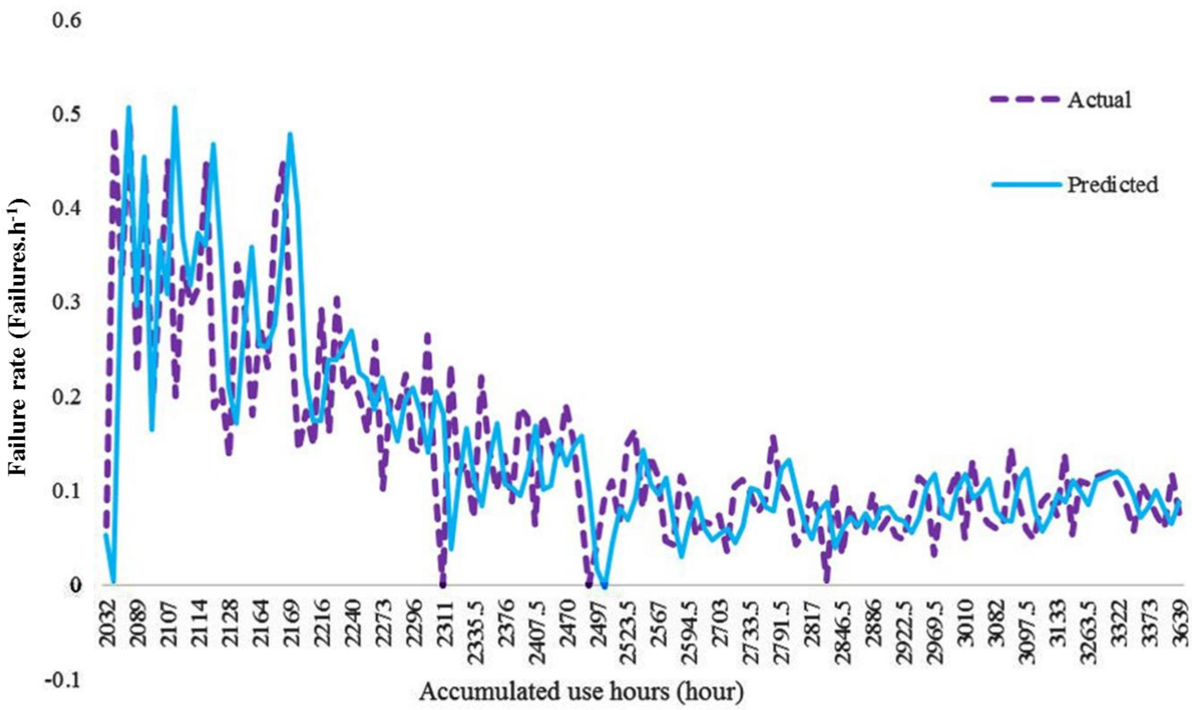
شکل ۵– تابع توزیع تجربی مانده‌ها در کاغذ احتمالاتی نرمال برای نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Fig. 5. Normal of probability plot for sugarcane harvester failure rate

جدول ۵- خلاصه‌ای از پارامترهای آماری بهترین مدل‌های آریما برازش یافته بر نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر

Table 5- Summary of the statistical parameters of the best fitted ARIMA models on the sugarcane harvester failure rate

متغیر Variable	مدل Model	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3	θ_1	θ_2	θ_3	Q	AIC	MAPE (%)	RMSE
نرخ خرابی Failure rate	ARIMA (1,3,1)	-0.697			0.99			57.5	-108.67	0.76	0.132
	ARIMA (1,3,2)	-0.495			1.98	-0.996		26.07	-124.003	0.56	0.114
	ARIMA (1,3,3)	-0.578			1.85	-0.72	-0.13	29.96	-105.24	0.58	0.116
	ARIMA (2,3,1)	-0.97	-0.4		0.99			43.95	-85.95	0.7	0.126
	ARIMA (2,3,2)	-1.5	-0.69		0.31	0.68		52.105	-120.5	0.76	0.129
	ARIMA (2,3,3)	-1.3	-0.47		1.09	0.77	-0.88	25.13	-69.64	0.57	0.125
	ARIMA (3,3,1)	-1.1	-0.7	-0.31	0.98			48.03	-103.19	0.62	0.12
	ARIMA (3,3,2)	-1.9	-1.3	-0.4	0.95	0.9		45.17	-86.23	0.7	0.127
	ARIMA (3,3,3)	-1.2	-0.63	-0.25	1.4	0.14	-0.57	33.03	-94.71	0.63	0.116



شکل ٦- سری زمانی مقادیر واقعی و پیش‌بینی‌شده نرخ خرابی

Fig. 6. Time series curve of failure rate real and predicted values

تغییرات سری زمانی نرخ خرابی واقعی و پیش‌بینی‌شده در ساعت‌های استفاده تجمعی در شکل ۶ نیز مبین دقت بالای این روش هست. همانطور که مشخص است شکل و تغییرات مقادیر پیش‌بینی‌شده با استفاده از مدل ARIMA (1,3,2) بسیار مشابه و منطبق با مقادیر واقعی نرخ خرابی است. مورد دیگری که در رابطه با شکل ۶ مشهود است روند تغییر متغیر نرخ خرابی در طول ساعت‌های مختلف استفاده تجمعی است. در این شکل در ابتدا نوسانات نرخ خرابی زیاد است زیرا این مرحله شروع به‌کار استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه بوده است و خرابی‌های دستگاه به‌دلیل نقص در بررسی و تعمیرات اورهال[1] بیشتر است اما با افزایش و تداوم اعمال نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه در طول سال‌های بعدی به‌تدریج از نوسانات نرخ خرابی کاسته شده و به یک مقدار تقریباً ثابت می‌رسد که این امر به‌دلیل کاهش فواصل و افزایش تعداد تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد، این نتایج با یافته‌های Ma *et al.* (2007) که کاهش فواصل زمانی تعمیرات پیشگیرانه را در بهبود خرابی و قابلیت اطمینان تجهیزات مؤثر دانستند همخوانی دارد.

1- Overhaul

نتیجه‌گیری

پیش‌بینی نرخ خرابی ماشین برداشت نیشکر نقش عمده‌ای در کنترل و کاهش خرابی دستگاه و برنامه‌ریزی عملیات برداشت نیشکر در زمان مناسب دارد. استراتژی کلیدی در کاهش توقفات و خرابی‌های بزرگ ماشین‌های پیچیده و گران‌قیمتی مثل ماشین برداشت نیشکر، نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه می‌باشد. بنابراین ترکیب این دو به معنی پیش‌بینی نرخ خرابی در استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه زمینه سنجش دقیق‌تر دسترس‌پذیری ماشین را فراهم می‌آورد. طبق نتایج به‌دست آمده، اجرای استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه موجب کاهش نرخ خرابی و افزایش کارایی عملیاتی ماشین برداشت نیشکر شده است. با وجود کاهش نرخ خرابی در زیرسیستم‌های مختلف ماشین برداشت نیشکر، زیرسیستم‌های تاپر، برق و موتور به‌ترتیب با ۹۴/۷۵، ۸۰/۴۶ و ۵۸/۷۴ درصد کاهش خرابی‌ها در سال آخر بررسی نسبت به سال اوّل بیشترین تأثیرپذیری را از استراتژی نگهداری و تعمیرات پیشگیرانه داشتند. علاوه بر این، الگوی ARIMA (1,3,2) در مورد پیش‌بینی نرخ خرابی در استراتژی پیشگیرانه دقت بالایی نشان داد.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از بنیاد ملّی نخبگان به‌خاطر حمایت مالی انجام این مطالعه در قالب هسته پژوهشی تحلیل سامانه‌های کشاورزی و زیستی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌گردد.

References

1. Afsharnia, F. 2017. Failure Rate Analysis. PP 99-115 in A. Ali eds. Failure Analysis and Prevention. Intech Open, London.
2. Afsharnia, F., M. A. Asoodar, and A. Abdeshahi. 2014. Regression Analysis Modeling the Failure Rate and Finding the Effective Failure Factors of Tractors in Khuzestan province. Journal of Agricultural Engineering 36 (2): 49-58. (In Farsi).
3. Almasi, M., and H. R. Yaganeh. 2002. Determining a suitable mathematical model to predict the repair and maintenance costs of farm tractors in Karoon agro-industry co. Iranian Journal of Agricultural Sciences 33 (4): 707-716. (In Farsi).
4. Amari, V., and McLaughlin. 2006. Cost effective condition-based maintenance using markov decision processes. The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 1-6.
5. Amin, A., L. Grunske, and A. Colman. 2013. An approach to software reliability prediction based on time series modeling. Journal of Systems and Software 86 (7): 1923-1932.
6. Aneke, D. O. 1994. A Survey of farm power problem in Nigeria. Applied Engineering in Agriculture 10 (5): 623-626.
7. Anonymous. 2004. Eviews 5 User's Guide. Quantitative Micro Software, LLC. Eviews Inc.
8. Atashgar, K., and A. Saravany. 2016. Failure prediction and diagnostic analysis for lathes using a hybrid approach including artificial neural network and decision making block. International Journal of Industrial Engineering and Production Management 27 (2): 143-156. (In Farsi).
9. Bowers, W., and D. Hunt. 1970. Application of Mathematical Formulas to Repair Cost. Transactions of the ASAE. 13 (6): 806-809.
10. Box, G. E. P., G. M. Jenkins, and G. C. Reinsel. 2014. Time series analysis: forecasting and control. Translated by Meshkani, M.R. Sharif University of Technology press. 4th edition. 842pp.
11. Currie, R. G. 1989. Comments on power spectra and Coherence of Drought in the interior Plains. International Journal of Climatology 9: 91-100.
12. Day, R. H. 1965. Probability distributions of field crop yields. Journal of Farm Economics 47: 713-741.
13. Dodangeh, S., J. S. Abedi Koupai, and A. Gohari. 2012. Application of time series modeling to investigate future climatic parameters trend for water resources management purposes. Journal of Water and Soil Science 16 (59): 59-74. (In Farsi).
14. El-Din, A. G., and D. W. Smith. 2002. A neural network model to predict the wastewater inflow incorporating rainfall events. Water Research 36 (1): 115-112.
15. Engle, R. F. and C. W. Granger. 1987. Co-integration and error correction: representation, estimation, and testing. Econometrica: Journal of the Econometric Society 251-276.
16. Faraj zadeh, Z., and A. Shah Vahi, 2009. Forecasting agricultural crops prices: case study of cotton, rice and saffron. Journal of Agricultural Economics and Development 17 (67): 43-72. (In Farsi).
17. García, F. P., D. J. Pedregal, and C. Roberts. 2010. Time series methods applied to failure prediction and detection. Reliability Engineering and System Safety 95 (6): 698-703.
18. Grisso, R. D., and R. Pitman. 2009. Five strategies for extending machinery life. Extension engineer, Biological Systems Engineering Department. University of Nebraska USA, 442-451.

19. Hall, R. A., and L. K. Daneshmend. 2010. Reliability modeling of surface mining equipment: data gathering and analysis methodologies. International Journal of Surface Mining and Reclamation and Environment 17 (3): 139-155.
20. Hansen, R. C. 2008. Overall equipment effectiveness. Translated by Ahmadi, H. Arkan Danesh press. 288 pp. (In Farsi).
21. Jacobs, C. O., W. R. Harrell, and G. C. Shinn. 1983. Agricultural power and machinery. McGraw-Hill. Inc. New York.
22. Kader, M., T. Ramani, J. Johnson, C. Speigelman, and J. Zietsman. 2014. FLEET equipment perf ormance measurement preventive maintenance model: final report. Texas department of transportation Federal highway administration. Texas a&m transportation institute. 76 PP.
23. Karbasi, M., M. Shahsavari, O. Veisi, and S. Fathi, 2011. Enhancement of equipment efficiency in the army through applying predictive, forecasting and comprehensively productive network-based repair and maintenance methods. Military Management Journal 43 (11): 103-134. (In Farsi).
24. Khodabakhshian, R., and M. Shakeri, 2011. Prediction of repair and maintenance costs of farm tractors by using of Preventive Maintenance. International Journal of Agriculture Sciences 3 (1): 39-44.
25. Ma, L., Y. Sun, and J. Mathew. 2007. Effects of Preventive Maintenance on the reliability of production lines. In Proceedings 2007 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2007): 631-635, Singapore.
26. Monjezi, N., H. Zaki Dizaji, M. J. Sheikhdavoodi, A. Marzban, and M. Shomeili. 2017. Application of fuzzy GERT method in operations scheduling of sugarcane production. Journal of Agricultural Engineering 40 (1): 125-139.
27. Morris, J. 1988. Estimation of Tractor Repair and Maintenance Costs. Journal of Agricultural Engineering Research 41: 191-200.
28. Najafi, P., M. A. Asoodar, A. Marzban, and M. Hormozi. 2014. Reliability evaluation and analysis of sugarcane 7000 series harvesters in sugarcane harvesting. Journal of Agricultural Machinery 5 (2): 446-455. (In Farsi).
29. Pinches, G. E. 1970. The Random Walk. Hypothesis and Technical Analysis. Financial Analysis Journal. (March-April 1970): 104-110.
30. Rasekhi, R., and M. Shamsi. 2010. A case study for determining and evaluation a mathematical model to predict the repair and maintenance costs of MF285 tractors. 6th National Conference on Agricultural Machinery Engineering and Mechanization. Tehran. Iran. (In Farsi).
31. Rohani, A. 2013. Prediction of tractor repair and maintenance costs using rbf neural network. World Applied Sciences Journal 28 (12): 1929-1937.
32. Rohani, A., I. Ranjbar, Y. Ajabshir, M. H. Abbaspour-Fard and M. Valizadeh. 2009. Prediction of two-wheel drive tractor repair and maintenance costs using artificial neural network in comparing with regression. Journal of Agricultural Science and Natural Resources. 16 (Special issue 1-a): 225-235.
33. Sabir, M. S., M. A. Zaidi, and G. S. Sheikh. 1990. Mathematical model for repair and maintenance costs of agricultural machinery. Pakistan Journal of Agricultural Sciences 27 (1): 30-33.
34. Saplioglu, K., M. Cimen, and B. Akman. 2010. Daily precipitation prediction in Isparta station by artificial neural network: Ohrid, Republic of Macedonia.
35. Say, S. M., and S. K. Sumer. 2011. Failure rate analysis of cereal combined drills. African Journal of Agricultural Research 6 (6): 1322-1329.
36. Shirmohammadi, A. 2002. Repair and maintenance planning. Arkane Danesh. Iran. 315p. (In Farsi).
37. Vafaee, M. R., H. Mashhadi Meighani, and A. Borgheei. 2008. Determination the mathematical model of repair and maintenance cost of New Holland TM155 and Valtra 8400 tractors in Markazi and Fars Provinces. Journal of New Finding in Agriculture 2 (2): 190-200. (In Farsi).
38. Vafaei, M. R., H. Mashadi Meighani, M. Almasi, and S. Minaei. 2010. Choosing of most appropriate method for reliability parameter calculation on cereal harvesting machine John deer 955 in Markazi province. Daneshe Novine Keshavarzi magazine, 5 (15): 143-151. (In Farsi).
39. Wireman, T. 2005. Developing performance indicators for managing Maintenance. Industrial Press, Inc., New York, NY.

Journal of Agricultural Machinery
Vol. 10, No. 2, Fall- Winter 2020, p. 347-359

نشریه ماشین‌های کشاورزی
جلد ۱۰، شماره ۲، نیمسال دوم ۱۳۹۹، ص ۳۵۹-۳۴۷

Investigating The Long-term Effect of Preventive Maintenance Strategy on The Operational Efficiency and Failure Rate of Sugarcane Harvester Using Time Series

F. Afsharnia[1*], A. Marzban[2]

Received: 12-02-2018
Accepted: 26-06-2018

Introduction

Optimal operation and maintenance of engineering systems heavily relies on the accurate prediction of their failures. Repairable engineering systems are well known in industries. A repairable engineering system indicates that the performance of this system after each failure can be restored through suitable maintenance. It is normally a complex system composed of a number of components. Failure prediction of a repairable system and its subsystems is an important topic in the reliability engineering. One of the most important repairable systems in agro-industrial companies is the sugarcane harvester. This machine has a key role in harvesting operations of sugarcane plant. The failures of this machine causes delay in operations and reduce products yield and quality. Currently, preventive maintenance is conducted on these harvesters to improve the overall reliability of these systems. Therefore, in this study, the long-term effect of preventive maintenance strategy on the efficiency and failure rate of the sugarcane harvester was investigated.

Materials and Methods

This research was carried out on 30 sugarcane harvesters used by sugarcane and by Products Development Company of Khuzestan during 6 years period. The goal of this study was to introduce a methodology aimed to acquire the information to predict the effect of preventive maintenance strategy on the failure rate and efficiency of sugarcane harvester by time series. Time series forecasting is the use of a model to predict future values based on previously observed values. The expected shape is a forecast from a combination of an ARIMA models (AR, MA, ARMA and ARIMA). The first step in analyzing the time series is plotting the data and obtaining the sample records. The next step is consideration of a trend and periodic components and remove them from the time series and fitting the static model on the time series. The next stage is implementation of the data normalization using skewness coefficient method and their normalization through logarithm differentiation of data. The arithmetic mean of data was applied to obtain zero average of the time series. Sample ACF (Auto Correlation Function) and PACF (Partial Auto Correlation Function) was drawn and then the model rank "a" was recognized and selected by comparison of ACF and PACF for AR, MA, ARMA, and ARIMA models.

Results and Discussion

According to the results of failure rate related to the sugarcane harvester, it can be found that the mean failure rate of this machine for the 6-years period was equal to 0.147 per hour. The minimum and maximum value of the failure rate were 0 and 0.517 per hour, respectively. The mean annual use hours of these harvesters was 189.8 h. Although the accumulated used hours increased, the mean time between failures (MTBF) was increased. According to Jacobs et *al*. (1983), the machines may breakdown due to a design defect, physical damage, or normal wear and tear, but many times machines fail because of a neglect and the lack of properly scheduled maintenance. In this study, implemented preventive maintenance resulted in decreasing of failure rate and increasing of machine efficiency as well. In 2016, the failure rate of sugarcane harvester was decreased by 73.23% and the machine efficiency was increased by 14.9% compared to 2011, because timely preventative maintenance and inspection will not only help to reduce major problems and downtime, but it will also help to identify problems when they can be corrected with relatively minor repairs. Among the 12 studied subsystems, topper, electric and motor subsystems were more affected by preventive maintenance by 94.75%, 80.46% and 58.74% decreasing in the failure rate, respectively. With regard to the evaluation criteria such as AIC, MAPE and RMSE, the ARIMA (1, 3, 2) model was determined as a suitable model for predicting the failure rate of sugarcane harvester. Furthermore, there is no significant difference between statistical descriptive measures of forecasting and actual tractor failure rate that it represents high accuracy of forecasting via ARIMA model.

1- PhD candidate of Agricultural Machinery Engineering Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran

2- Associate Professor of Agricultural Machinery Engineering Department, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran

(*- Corresponding Author Email: phd.afsharnia@asnrukh.ac.ir)

Conclusions

This study was adapted to the preventive maintenance as a useful strategy that could increase availability and operational efficiency of the sugarcane harvester. Furthermore, it focused on time series modeling method to analyze and forecast the reliability characteristics such as the expected number of failures per interval (failure rate). It is found that time series model is a viable alternative that gives satisfactory results for interval failure predictions in terms of its predictive performance for the sugarcane harvester reliability.

Keywords: ARIMA, Efficiency, Failure rate, Forecasting, Sugarcane harvester